

基于流体力学方法的砂土液化后研究进展

陈育民^{1,2},周云东^{1,2}

(1.河海大学岩土工程水利部重点实验室,江苏 南京 210098;2.河海大学岩土工程研究所,江苏 南京 210098)

摘要 对基于流体力学方法的砂土液化后研究方法(包括试验、解析和数值分析方法)进行了综述,并通过对表观黏度与剪应变率关系的分析,得出了液化砂土是一种剪切稀化非牛顿流体的结论,同时指出了砂土液化后研究方法存在的问题:(a)对液化砂土的定性仍不明了,需通过大量的试验来确定液化砂土的非牛顿类型;(b)试验中将液化后砂土假设为牛顿流体,这与液化后砂土的非牛顿特性相矛盾。

关键词 砂土液化 剪切稀化非牛顿流体 研究方法

中图分类号 :TU441

文献标识码 :A

文章编号 :1000-1980(2007)04-0418-04

地震液化是岩土地震工程研究中的一个重要课题.根据力学理论基础的不同,可以将砂土液化后问题的研究广义地分为基于固体力学方法的砂土液化后研究和基于流体力学方法的砂土液化后研究.前者从经典土动力学理论出发,假设土体从地震发生前到液化始终呈固体状态,并采用特定的本构模型或方法描述砂土液化问题,计算液化引起的地面变形^[1-4];后者采用流体力学方法来分析砂土的液化机理与液化后变形特性.Sasaki 等^[5]通过试验研究了液化变形的产生机理,并得到了液化砂土与流体非常类似的结论.研究表明,引入流体力学的观点可以很好地解释建筑物下沉、地下管线及排污水槽上浮等液化场地出现的震害现象.

本文对基于流体力学方法的砂土液化后研究进展进行了综述,并通过与已有试验成果的对比,分析了液化砂土的率相关性,得出了液化砂土是一种非牛顿流体的结论.

1 研究方法

1.1 试验研究

基于流体力学方法的砂土液化后研究所采用的主要试验方法是振动台试验、振动扭剪三轴试验、离心机试验和黏度计试验.

1.1.1 振动台试验

通过振动台试验可以获得比较稳定的液化状态.相对于三轴试验,振动台试验具有较大的试验尺寸,可以在振动台模型箱中进行其他试验.这种方法引入了流体力学的经典理论和试验原理,如空间绕球流动理论、平面绕流理论、落球黏度计原理等,并利用埋设在砂土中的某种物体(通常为球状物或管状物)运动过程中产生的位移和所受的力的监测数据来反算液化砂土的表现黏度(流体力学中定义为剪应力与剪应变率的比值).Miyajima 等^[6]进行了振动台拖球试验和落球试验,Tamate 等^[7-8]进行了振动台拖管试验.由于他们在试验研究中假定液化砂土为牛顿流体,没有考虑拖动速率对试验结果的影响,所得结果往往是液化后砂土表现黏度的大概数值.

1.1.2 振动扭剪三轴试验

振动扭剪三轴仪具有自动控制、自动数据采集和数据处理等功能,可用于砂土液化试验.Nishimura 等^[9]利用三轴扭剪试验仪,以低围压下的应力状态模拟土体的液化状态,得到了液化砂土剪应力与剪应变率的关系,但这种关系与普通牛顿黏性流体不同.为了考虑率相关性的影响,施加轴向荷载时采用了逐渐加载方法.周云东^[10]利用振动扭剪多功能三轴仪进行了液化后砂土的大变形试验研究.陈育民等^[11]在文献^[10]试验成果的基础上分析了液化及液化后砂土的流动特性,认为砂土在液化状态下是一种剪切稀化非牛顿流体,而随

着液化后孔压的降低,所有试验的表观黏度与孔压比的关系均分布在一个较窄的区域内,可以用一个数学表达式来拟合.

1.1.3 其他试验

佐藤等^①对辛浦标准砂进行了液化侧向流动离心机试验(离心加速度分别为 25*g* 和 50*g*),并通过试验中砂土变形过程的监测得到了液化后砂土的表观黏度. Towhata 等^[8,12-13]直接用流体力学的试验仪器(如黏度计)来测定液化砂土的表观黏度.

1.2 解析分析

简化砂土液化后的变形模式,将液化后砂土假设为牛顿流体,根据最小势能原理可以得到简单边界条件下的变形解析解. Towhata 等^[14]根据振动台试验结果将液化土体的侧向变形曲线假设为正弦函数曲线,即

$$u = F(x)\sin(\pi(z - B)/(2H)) \tag{1}$$

式中: u ——液化层的侧向变形; $F(x)$ ——液化层表层的变形; z ——液化层的高度; B ——底部非液化层的厚度; H ——液化层的厚度.

这种解析方法只能应用于二维情形,而且这种解析方法采用了最小势能原理,计算出来的变形是最大可能发生的变形,结果往往偏大.

1.3 数值分析

数值分析主要利用流体力学、岩土力学中的数值计算方法(如有限单元法、有限差分法等)对液化后变形进行分析. 这种方法的主要思路是:

a. 将液化后砂土假设为简单的牛顿流体,基于能量分析方法计算液化发生的最大可能变形. Orense 等^[12]通过假设的位移模式来考虑地形的影响,使 Towhata 的解析方法可以应用于三维情形,并用有限元方法进行了复杂场地液化变形的数值分析. Tamate 等^[7]将液化砂土视为黏性流体,根据最小势能原理计算液化后土体在重力作用下的流动变形,且分析中用大变形模式来反映几何非线性. 采用这种分析方法的前提有 2 个:一是地震为强烈地震;二是地震持时足够长. 只有同时满足这 2 个条件,才能使土体保持流动状态. 由于他们也采用了最大可能发生的变形的假定,计算变形均大于实际变形.

b. 应用流体力学计算方法研究液化后砂土的流动变形. 具体做法是在现有流体力学计算程序的基础上,改进流体本构模型,以反映砂土液化后的流动特性. Uzuoka 等^[13]采用压力耦合方程的半隐式算法(SIMPLE 算法)求解 Navier-Stokes 方程,采用 Bingham 流体模拟液化砂土. Hadush 等^[15]采用有限差分方法,分别通过 Bingham 流体和假塑性流体来模拟液化砂土. 这种分析方法只能用来分析简单边界条件下的砂土液化后变形,而实际岩土工程问题中的边界条件及结构(如沉箱、支护桩等)是比较复杂的. 因此,这种方法的应用有一定的局限性.

c. 在岩土工程专业软件已有的液化计算功能的基础上,改进本构模型,以反映砂土液化后的变形特性. 陈育民等^[16]根据试验结果建立了液化后砂土的流体本构模型,并将该模型应用到有限差分程序 FLAC^{3D}中,改进了 Finn 模型的液化后处理功能,得到了能够反映土体液化及液化后变形的 PL-Finn(Post Liquefaction Finn)模型. 这种分析方法不仅能够很好地描述液化后砂土的流动特性,而且可以发挥程序原有的土体计算及土-结构相互作用计算的强大功能.

2 液化砂土流动的率相关性分析

材料的力学响应与加载速率(应变率)相关的性质称为率相关性. 采用流体力学方法分析砂土液化后问题时,应考虑应变率的影响. 本文利用部分试验成果^[11,13,15]点绘了表观黏度与剪应变率之间的关系图,如图 1 所示(图中 D_r 为砂土的相对密度, σ_c 为试验进行时的围压, F_L 为液化度).

从图 1 可以看出,应变率较低时,液化砂土具有极高的表观黏度,而随着剪应变率的增大,黏度会逐渐降低,呈现典型的“剪切稀化”^[17]特征. 该特征是典型非牛顿流体所具有的特征. 由此可知,液化状态下的砂土属于一种非牛顿流体.

从图 1 还可以看出,不同的试验方法有着不同的剪应变率. 动力扭剪三轴仪的剪应变率较小,仅为 10^{-5}

① 佐藤,大保直人,浜田政则. 动的远心模型试验装置による砂地盤の側方流动现象に関する基础实验. 日本土木学会第 49 回年次学术演讲会. 1994 520-521.

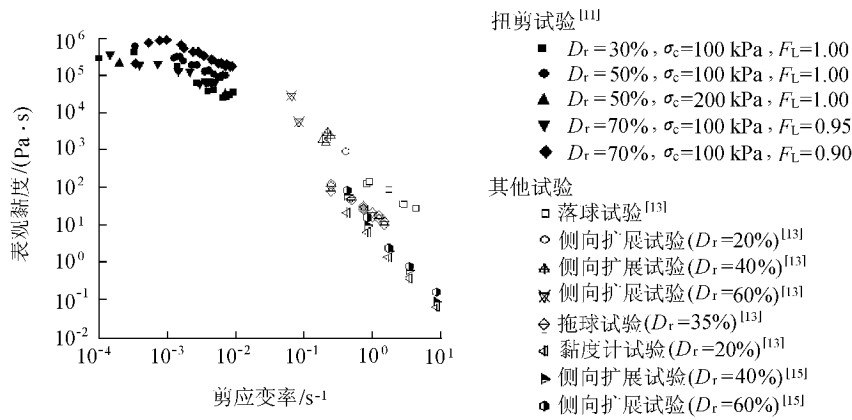


图 1 液化砂土的表现黏度与剪应变率的关系

Fig.1 Relationship between apparent viscosity and shear strain rate of liquefied sand

$\sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 拖球试验、落球试验和流滑试验(侧向扩展试验)的剪应变率为 $10^{-1} \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 而黏度计则具有高达 $1 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 的剪应变率. 由于非牛顿流体具有明显的率相关性, 选择试验方法时要充分考虑地震中砂土液化后变形的实际速率, 使试验中的剪切速率尽量符合实际, 这样, 试验得到的流动参数才能更好地用于液化变形计算.

3 结 论

根据流体力学观点, 液化砂土与泥浆、水煤浆、高含沙水流、泥石流等一样, 属于非牛顿流体的范畴. 目前, 基于流体力学方法的砂土液化后研究成果不多, 还有大量的问题需要解决. 其中的主要问题是:

a. 对液化砂土的定性仍不明了, 目前争议主要集中在 Bingham 流体和假塑性流体(剪切稀化非牛顿流体)之间, 仍需通过大量的试验来确定液化砂土的非牛顿类型.

b. 目前的试验都基于牛顿流体的假设, 即试验中先假设液化后砂土为牛顿流体, 然后再计算液化后砂土的流动参数. 这与液化后砂土的非牛顿特征相矛盾. 因此, 液化试验时需采用能够反映非牛顿特征的仪器装置或试验方法. 由于非牛顿流体具有率相关性, 试验中还要考虑地震中砂土液化的变形速率.

c. 液化后砂土大变形计算不能单一地采用流体动力学或岩土力学方法, 要采用两者相结合的计算方法来分析复杂条件下液化场地的地表及构筑物变形.

参考文献:

[1] 刘汉龙. 土动力学与岩土地震工程[C]//中国土木工程学会. 第九届土力学及岩土工程学术会议论文集. 北京: 清华大学出版社, 2003 56-68.

[2] 张建民, 王建华. 土动力学与土工抗震[C]//王铁宏, 杨灿文, 张在明, 等. 第八届土力学及岩土工程学术会议论文集. 北京: 万国学术出版社, 1999 44-55.

[3] 鲁晓兵, 谈庆明, 王淑云, 等. 饱和砂土液化研究新进展[J]. 力学进展, 2004, 34(1): 87-96.

[4] FINN W D L. State-of-the-art of geotechnical earthquake engineering practice[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000, 20: 1-15.

[5] SASAKI Y, TOWHATA I, TOKIDA K I, et al. Mechanism of permanent displacement of ground caused by seismic liquefaction[J]. Soils and Foundations, 1992, 32(3): 79-96.

[6] MIYAJIMA M, KITAURA M, KOIKE T, et al. Experimental study on characteristics of liquefied ground flow[C]//Proceedings of First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Rotterdam: A. A. Balkema, 1995 969-974.

[7] TAMATE S, TOWHATA I. Numerical simulation of ground flow caused by seismic liquefaction[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1999, 18: 473-485.

[8] TOWHATA I, VARGAS-MONGE W, ORENSE R P, et al. Shaking table tests on subgrade reaction of pipe embedded in sandy liquefied subsoil[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1999, 18: 347-361.

[9] NISHIMURA S, TOWHATA I, HONDA T. Laboratory shear tests on viscous nature of liquefied sand[J]. Soils and Foundations, 2002,

42(4) 89-98.

[10] 周云东. 地面液化引起的地面大变形试验研究[D]. 南京 河海大学, 2003.

[11] 陈育民, 刘汉龙, 周云东. 液化及液化后砂土的流动特性分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9) :1139-1143.

[12] ORENSE R P, TOWHATA I. Three dimensional analysis on lateral displacement of liquefied subsoil[J]. Soils and Foundations, 1998, 38(4) :1-15.

[13] UZUOKA R, YASHIMA A, KAWAKAMI T, et al. Fluid dynamics based prediction of liquefaction induced lateral spreading[J]. Computers and Geotechnics, 1998, 22(3/4) :243-282.

[14] TOWHATA I, SASAKI Y, TOKIDA K I, et al. Prediction of permanent displacement of liquefied ground by means of minimum energy principle[J]. Soils and Foundations, 1992, 32(3) :97-116.

[15] HADUSH S, YASHIMA A, UZUOKA R. Importance of viscous fluid characteristics in liquefaction induced lateral spreading analysis [J]. Computers and Geotechnics, 2000, 27 :199-224.

[16] CHEN Yu-min, LIU Han-long. Coupled hydraulic-mechanical analysis of large deformation of post-liquefied sand[C]//XU Wei-ya, TAN Xiao-long, YANG Sheng-qi. Advances on Coupled Thermo-hydro-mechanical-chemical Processes in Geosystems and Engineering. Beijing : Science Press, 2006 :370-375.

[17] 沈崇堂,刘鹤年. 非牛顿流体力学及其应用[M]. 北京 高等教育出版社, 1989 :1-7.

Advances in sand post-liquefaction research based on fluid mechanics method

CHEN Yu-min^{1,2}, ZHOU Yun-dong^{1,2}
(1. Key Laboratory for Geotechnical Engineering of Ministry of Water Resources ,
Hohai University, Nanjing 210098, China ;
2. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract :A review was made on sand post-liquefaction research methods based on fluid mechanics, including laboratory tests, theoretical analysis and numerical simulation. According to the test data, the relationship between the apparent viscosity and the shear strain rate was analyzed. It is concluded that the liquefied sand is a shear-thinning non-Newtonian fluid, and the existing problems in the research are put forward as follows :the type of the liquefied sand is not clear, and great deal of experiments should be performed to determine the non-Newtonian fluid type of liquefied sand ;the liquefied sand is assumed as Newtonian fluid in the test, and the assumption is in conflict with the non-Newtonian characteristics of liquefied sand.

Key words :sand liquefaction ; shear-thinning non-Newtonian fluid ; research method